干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

1981—2018年内蒙古典型草原季节性冻土对气候变化的响应

苏 玥[1]， 张存厚[1,2]， 阿木尔萨那[3]， 李 轲[4]

（1. 内蒙古自治区气象灾害监测预警与人工影响天气中心，内蒙古 呼和浩特 010051；2. 内蒙古自治区生态与农业气象中心，内蒙古 呼和浩特 010051；3. 内蒙古自治区呼和浩特市气象局，内蒙古 呼和浩特 010000；4. 江苏省徐州市气象局，江苏 徐州 221000）

摘 要：以1981—2018年内蒙古典型草原季节性冻土为研究对象，通过气候倾向率、Mann-Kendall法、多元线性回归等方法，分析最大冻土时空分布特征、年际、年代际变化，研究影响最大冻土深度变化的气象因子。结果表明：（1）内蒙古典型草原季节性冻土冻结初日在9—11月，终日在4—6月，年内最大冻土深度出现在2—3月，深度在100~280 cm之间。（2）最大冻土深度年际变化分为下开口抛物线型、上开口抛物线型、正弦曲线型，从最大冻土深度气候倾向率看呈现减小趋势的站点有68%。（3）最大冻土深度年代际变化分为逐年代递减、减-增型和无明显变化规律，50%的站点在1989年以后最大冻土深度发生突变。（4）多元线性回归表明气温冻结指数、年平均风速、年极端最低气温对最大冻土深度产生显著影响。该研究揭示了最大冻土深度存在退化的事实，为草原应对气候变化提供指导，为陆地土壤和大气碳循环交换的研究给出提示。

关 键 词：季节性冻土；气候变化；典型草原；多元线性回归

文章编号：

冻土是指零摄氏度以下，含有冰的各种岩石和土壤，冻土分为短期冻土、季节性冻土和多年冻土3种，其中夏季融化、冬季冻结且冻结时间超过1个月不足1 a的土称为季节冻土[1]。冻土作为气候变化影响的重要中介，受地形地势、下垫面的影响较大，是不稳定地质体，对于区域气候变化具有明显指示作用[2-4]。季节性冻土易受季节变化影响，直接参与地球的热量平衡，对气候变化的响应更加敏感[5]。已有研究[6-11]表明，随着全球气候变暖，多地出现冻土层变薄、冻结时间推迟、解冻日期提前等现象。中国最大冻土深度20世纪80年代以来开始减小，90年代减小显著[12]，季节性冻土变化受温度、降水等气候因素影响[13]。在冻土深度和温度关系方面，Tokumoto等[14]在日本东北部草地研究表明，土壤冻结期间水热耦合对于预测冻土和未冻土非常重要；Sinha等[15]研究显示，气温的高低与降雪的次数影响着印第安纳州北部的冻土深度和冻融循环次数。在冻土深度和降水量关系方面，Fu等[16]研究表明冻土深度与土壤水热交换相关，在土壤冻结期间，积雪阻碍了积温对冻土层厚度的影响；Wlostowski等[17]量化了土壤活动层冻结频率，证明了土壤水分的轻微增加可能会影响气候变暖，导致土壤冻融循环加剧。在中国，多地季节性冻土受区域气候变暖影响强烈。青藏高原季节性冻土冻结天数缩减[18]，温度升高、降水增加对冻土增厚不利；新疆塔什库尔干河谷1960—2015年间季节性冻土冻结初日推迟，冻结终日提前，年冻结日数减少，年累积冻土深度减小，最大冻土深度减小[19]；辽宁省虽1 a中有42%的时间土壤处于冻结状态，但最大冻土深度也正在逐年减小[20]；河西走廊东部冻土始冻期推迟、

收稿日期：2021-07-13； **修订日期**：2021-10-26

基金项目：内蒙古自然科学基金项目（2019MS04006）；内蒙古自治区科技计划项目（2021GG0020）；内蒙古自治区科技计划重点项目（201802123）资助

作者简介：苏玥（1990-），女，在读硕士，工程师，主要从事气象灾害监测及预警研究. E-mail: 1493117872@qq.com

通讯作者：张存厚（1977-），男，博士，正高级工程师，主要从事草地生态和气候变化等相关研究. E-mail: zhangcunhou2004@163.com

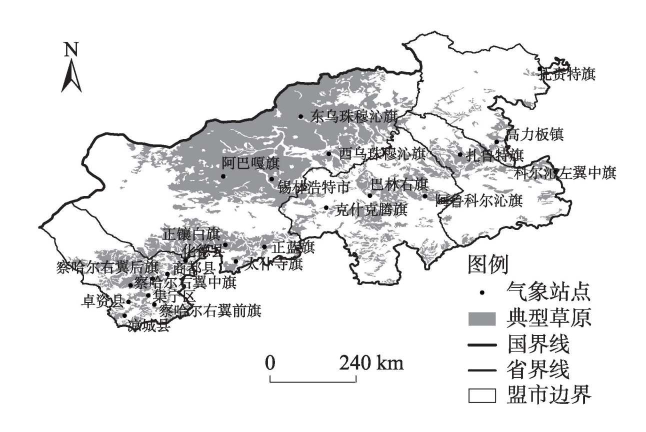
解冻期提前，在时间序列上存在准周期变化[21]；西藏大部分地区最大冻土深度呈现减小趋势，并随着海拔升高，减幅加大[22]。

IPCC第四次评估报告显示，近百年来全球地表平均温度上升了0.74 ℃[23]。在全球变暖的背景下，冻土作为气候变化的感应器，其退化和消融不仅影响生态环境、农田水利等规划建设[24-26]，而且冻土中所含的碳释放在空气中加剧了全球变暖[27]。在内蒙古通常采用近地表负积温的变化来反映冻土深度的变化规律，采用冻结指数作为量化季节性冻土深度变化的气候参数，冻结指数常在评估冻土分布规律、气候变化等领域应用[28]。内蒙古典型草原位于欧亚大陆腹地，常年光照充足、降水稀少，生态环境敏感，大部分地区为季节性冻土区，然而基于较长时间序列冻土资料研究内蒙古草原季节性冻土对气候变化响应的分析相对较少，因此，本文利用研究区22个站点1981—2018年的冻土与气象因子等资料，运用气候诊断分析方法，对内蒙古典型草原季节性冻土的年内、年代际变化、气候突变等特征进行分析，以揭示内蒙古典型草原季节性冻土缩减的事实，为内蒙古草原应对气候变化提供理论指导。

1　研究区、数据与方法

1.1　研究区概况

内蒙古典型草原是在半干旱气候条件下形成的草地，是内蒙古天然草地的主体，是欧亚大陆草原区的重要组成部分。内蒙古典型草原主要位于内蒙古的中东部地区，东北部呼伦贝尔地区的典型草原气候较为寒冷，主要处于多年冻土区[29]；内蒙古中部和东南部的气候相对温暖，冻土在年内有融化现象，存在季节性冻土。本文研究季节性冻土变化，选择内蒙古中部和东南部的典型草原做为研究区(111°07′~123°04′E，40°12′~46°42′N)(图1)。其主要的优势植物有羊草、大针茅、冰草、寸草苔、糙隐子草、二裂委陵菜、冷蒿、小叶锦鸡儿等[30]。研究区气候类型为中温带半干旱大陆性季风气候，季节变化明显，平均海拔1024 m，年平均气温4.9 ℃，夏季平均气温19.9 ℃，7月平均最高温度21.3 ℃，夏季降水量223.6 mm，冬季平均气温-11.2 ℃，1月平均最低温度-15.5 ℃，最大积雪深度8.5 mm，年均风速3.0 m·s^{-1}，年降水量368.1 mm，降水主要集中在6—8月，占年降水量的50%~60%，年蒸发量1852.4 mm。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　内蒙古典型草原气象站点空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of meteorological stations in typical steppe of Inner Mongolia

1.2　资料来源

本文选取内蒙古典型草原时间序列较长且存在季节性冻土观测的22个气象观测站，采用冻土器进行冻土深度观测。1981—2018年逐日的冻土深度、平均气温、平均相对湿度、平均风速、降水量、日照时数、积雪深度、40 cm地温、80 cm地温等气象资料均来自于内蒙古自治区气象局。文中涉及到的地图来自于国家测绘地理信息局标准地图服务网站(http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/index.html)下载。1 a中冻土深度的最大值为最大冻土深度，冻土初日是1 a中下半年第一次土壤冻结日期，冻土终日是1 a中上半年最后一次出现冻土的时间[1]。冻结指数是指在一个冻结期内所有温度小于0 ℃的累积值，为了保持冻土冻结时间的连续性，本文研究计算冻结指数的时间是每年的7月1日至翌年的6月30日[31]。

1.3 研究方法

1.3.1　最大冻土深度的气候倾向率　建立最大冻土深度与其所对应时间的一元线性回归方程，计算公式[32]如下：

$$x_i = a + bt_i,\ \ i = 1, 2, \cdots, n \tag{1}$$

式中：x_i为最大冻土深度历年值(cm)；t_i为最大冻土深度x_i所对应的时间(a)；a为回归常数项，b为线性趋势项，a和b用最小二乘法进行估计；n为样本量(n=1, 2, ⋯, 38)。

1.3.2　最大冻土深度的累积距平　采用累积距平分析最大冻土深度年际变化趋势，其计算公式如下[32]：

$$x_t=\sum_{i=1}^{t}(x_i-\bar{x}),\quad t=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

式中：x_t为最大冻土深度累积距平值；x_i为最大冻土深度历年值(cm)；$\bar{x}$为最大冻土深度多年平均值(cm)；n为样本量(n=1, 2, …, 38)。

1.3.3 Mann-Kendall法突变检验 Mann-Kendall法是一种非参数统计检验方法，其优点在于不需要样本遵从一定的分布，也不受少数异常值的干扰，可以明确突变开始的时间，指出突变区域，更适用于类型变量和顺序变量[32]。对于具有n个样本量的最大冻土深度时间序列x，构造一秩序列：

$$S_k=\sum_{i=1}^{k}r_i,\quad k=2,3,\cdots,n \tag{3}$$

式中：r_i为第i个样本$x_i>x_j(1\leqslant j\leqslant i)$的个数；$S_k$是第$i$时刻数值大于$j$时刻数值个数的累积数；$n$为样本量($n$=1, 2, …, 38)。

在$x_1, x_2, \cdots, x_n$相互独立，且有相同连续分布时，S_k的均值$E(S_k)$和方差$\mathrm{Var}(S_k)$有下式：

$$\begin{cases}E(S_k)=\dfrac{k(k-1)}{4}\\ \mathrm{Var}(S_k)=\dfrac{k(k-1)(2k+5)}{72}\end{cases},\quad k=2,3,\cdots,n \tag{4}$$

定义统计量：

$$\mathrm{UF}_k=\frac{[S_k-E(S_k)]}{\sqrt{\mathrm{Var}(S_k)}},\quad k=1,2,\cdots,n \tag{5}$$

式中：$\mathrm{UF}_1=0$；UF_k服从标准正态分布。将序列按照时间逆序排列，计算出变量UB_k，统计序列构成的曲线UF_k与UB_k在置信区间内相交的点为突变点。

1.3.4 冻结指数计算 冻结指数的计算公式是在一个冻结期内，日平均温度负值的累积，计算公式为：

$$\mathrm{FI}=\sum_{i=1}^{N_F}|T_i|,\quad T_i<0 \tag{6}$$

式中：FI为冻结指数(℃·d)；T_i为逐日温度的负数(℃)；N_F为年内温度负数的日数(d)。

1.3.5 Pearson相关分析 Pearson相关系数，是常见的线性相关系数，常用r表示变量Y和X之间线性相关的程度，取值范围在[−1, +1]之间，$0.8\leqslant|r|\leqslant1$时高度相关，$0.5\leqslant|r|<0.8$时中度相关，$0.3\leqslant|r|<0.5$时低度相关，$0\leqslant|r|<0.3$微弱相关。计算公式为：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\times\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{7}$$

式中：r为线性相关程度；x_i为最大冻土深度历年值(cm)；$\bar{x}$为最大冻土深度多年平均值(cm)；y_i为气象因子；$\bar{y}$为气象因子均值；n为样本量(n=1, 2, …, 38)。

1.3.6 多元线性回归 多元线性回归模型包括k个变量，即一个因变量(最大冻土深度)和k个自变量(气象因子)。因此具有n个方程来概括回归模型：

$$Y_t=\beta_0+\beta_1X_{1t}+B_2X_{2t}+\cdots+\beta_kX_{kt}+\varepsilon_t,\quad t=1,2,\cdots,n \tag{8}$$

式中：Y_t为最大冻土深度(cm)；$\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_k$为(固定的)未知的参数向量；$X_{1t}, X_{2t}, \cdots, X_{kt}$为气象因子；$\varepsilon_t$为随机误差项；$n$为样本量($n$=1, 2, …, 38)。

其中模型的相应矩阵方程表示为：

$$Y=X\beta+\varepsilon \tag{9}$$

$$Y=\begin{pmatrix}Y_1\\Y_2\\\vdots\\Y_n\end{pmatrix},\quad X=\begin{pmatrix}1&X_{11}&\cdots&X_{k1}\\1&X_{12}&\cdots&X_{k2}\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\1&X_{1n}&\cdots&X_{kn}\end{pmatrix},\quad \beta=\begin{pmatrix}\beta_0\\\beta_1\\\vdots\\\beta_k\end{pmatrix},\quad \varepsilon=\begin{pmatrix}\varepsilon_1\\\varepsilon_2\\\vdots\\\varepsilon_n\end{pmatrix} \tag{10}$$

式中：Y为因变量观察的n列向量；X为自变量观察的$n\times(k+1)$矩阵；β为未知参数的$(k+1)$列向量；ε为误差观察的n列向量。在矩阵X表达式中，每一个元素X_{ij}都有2个下标，第1个下标表示相应的列(变量)，第2个下标表示相应的行(观察)。矩阵X的每一列表示相应给定变量n次观察的向量，与截矩有关的所有观察值都等于1。

本研究使用OriginPro 8.5制图，采用Microsoft Office 2019版的Excel计算最大冻土深度的气候倾向率、累积距平和Mann-Kendall法突变检验，运用SPSS 25.0进行最大冻土深度与气象因子Pearson相关分析、多元线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 最大冻土深度的时空分布

内蒙古典型草原季节性冻土具有显著的年内变化特征，季节性变化明显，冻土初日出现在9、10、11月，概率分别为8%、76%、16%；冻土终日出现在4、5、6月，概率分别为67%、30%、3%。通过分析1981—2018年内蒙古典型草原22个站点最大冻土深度每年出现时间(图2)可知，年内最大冻土深度主要出现在2—3月，在100~280 cm之间。在过去

38 a中，最大冻土深度最大值出现在2018年4月的察哈尔右翼后旗，深度达416 cm，最小值出现在2013年3月的扎鲁特旗，深度仅为172 cm。20世纪80年代末期是最大冻土深度显著下降的重要时间点。冻土北部冻结时间早于南部，解冻时间晚于南部，冻结持续时间北部长南部短；东部冻结时间早于西部，解冻时间晚于西部，冻结持续时间东部长西部短。

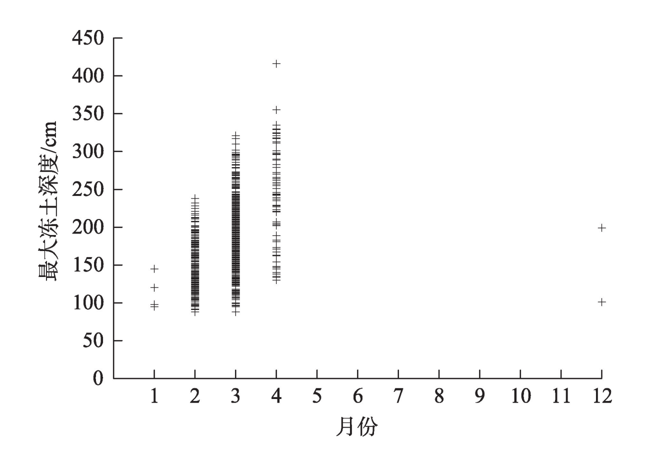


图2　内蒙古典型草原最大冻土深度出现的时间分布

Fig. 2　Occurrence time distribution of maximum frozen soil depth in typical steppe of Inner Mongolia

2.2　最大冻土深度的年际变化

为了更好得判断最大冻土深度长期演变趋势及持续性变化，将最大冻土深度序列进行累积距平计算(图3)。内蒙古典型草原最大冻土深度年际变化趋势可划分为3类。第1类是下开口抛物线型，变化趋势为先增大后减小，20世纪80年代呈现增加趋势，20世纪90年代中期之后为下降趋势；此类型站点最多，占研究区站点总数的45%，这些站点是扎赉特旗、东乌珠穆沁旗、阿巴嘎旗、察哈尔右翼后旗、卓资县、凉城县、集宁区、高力板镇、克什克腾旗、正镶白旗。第2类是上开口抛物线型，变化趋势为先减小后增大，20世纪80年代趋于下降趋势，2003年后最大冻土深度逐年增加；此类型站点占研究区站点总数的23%，这些站点是化德县、西乌珠穆沁旗、扎鲁特旗、科尔沁左翼中旗、锡林浩特市。第3类为正弦曲线型，变化趋势为增-减-增型，20世纪80年代呈增加趋势，20世纪80年代末期至2005年呈下降趋势，之后转为增加趋势。此类型站点占研究区站点总数的32%，这些站点是察哈尔右翼中旗、商都县、察哈尔右翼前旗、巴林右旗、阿鲁科尔沁旗、正蓝旗、太仆寺旗。

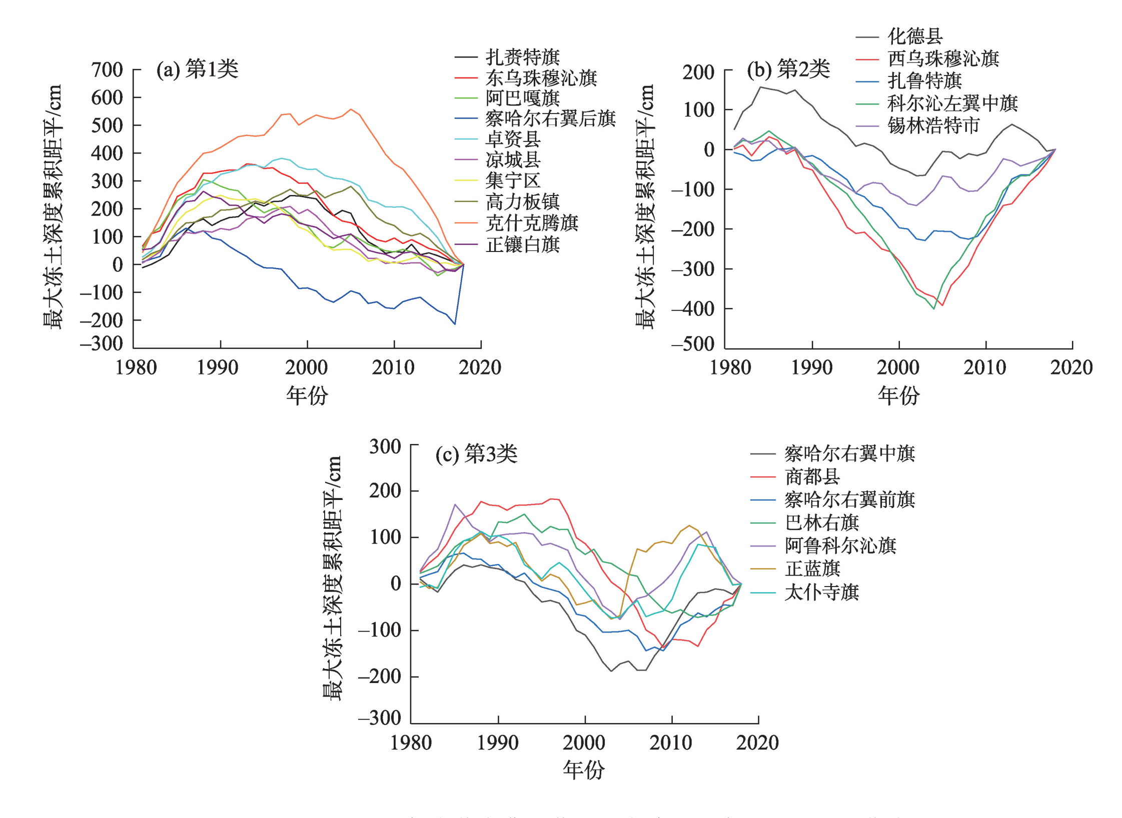


图3　1981—2018年内蒙古典型草原最大冻土深度的累积距平曲线

Fig. 3　Cumulative anomaly curves of maximum frozen soil depths in typical steppe of Inner Mongolia from 1981 to 2018

1981—2018年内蒙古典型草原22个站点中有15个站点的最大冻土深度呈减小趋势(表1),减小幅度为0.16~3.05 cm·(10a)$^{-1}$,其中通过0.01显著性检验的站点有9个,气候倾向率为0.70~3.05 cm·(10a)$^{-1}$,最大冻土深度变浅薄幅度最大的出现在克什克腾旗,气候倾向率为−3.05 cm·(10a)$^{-1}$(通过了0.01显著性检验),变浅薄幅度最小的出现在凉城县,气候倾向率为−0.70 cm·(10a)$^{-1}$(通过了0.01显著性检验);有7个站点最大冻土深度呈增加趋势,增加幅度为0.28~1.31 cm·(10a)$^{-1}$,其中通过0.01显著性检验的站点有3个,最大冻土深度增厚幅度最大的出现在西乌珠穆沁旗,气候倾向率为1.31 cm·(10a)$^{-1}$(通过了0.01显著性检验),增厚幅度最小的出现在扎鲁特旗,气候倾向率为0.85 cm·(10a)$^{-1}$(通过了0.01显著性检验)。内蒙古典型草原最大冻土深度气候倾向率的空间分布(图4),其变浅薄的区域主要分布在内蒙古典型草原的中部地区,高值区主要分布在克什克腾旗、阿巴嘎旗和东乌珠穆沁旗;最大冻土深度增厚的区域主要分布在东南地区和西南部地区,高值区主要分布在科尔沁左翼中旗、扎鲁特旗和西乌珠穆沁旗。

2.3 最大冻土深度的年代际变化

1981—2018年内蒙古典型草原各站年最大冻土深度的年代际变化主要分为3类(表2),第1类为逐年代递减型,这些站点是高力板镇、克什克腾旗、卓资县,21世纪10年代较20世纪80年代减小了37.0~87.2 cm,其中减幅最快的是克什克腾旗。第2类为减-增型,此类型站点最多,共有16个,其中阿巴嘎旗、西乌珠穆沁旗、扎鲁特旗、科尔沁左翼中旗、锡林浩特市、太仆寺旗、察哈尔右翼前旗、察哈尔右翼中旗、察哈尔右翼后旗、集宁区的最大冻土深度20世纪90年代较80年代变浅,21世纪之后增

表1 1981—2018年内蒙古典型草原最大冻土深度的气候倾向率

Tab. 1 Linear trend analysis of maximum frozen soil depth changing rates in typical steppe of Inner Mongolia from 1981 to 2018

/cm·(10a)$^{-1}$

站点	克什克腾旗	卓资县	东乌珠穆沁旗	高力板镇	阿巴嘎旗	扎赉特旗	正镶白旗	集宁区	凉城县	阿鲁科尔沁旗	商都县
气候倾向率	−3.0532**	−1.9700**	−1.6186**	−1.3624**	−1.0748**	−1.0060**	−0.9537**	−0.8673**	−0.7032**	−0.4415	−0.3507
站点	巴林右旗	正蓝旗	化德县	太仆寺旗	察哈尔右翼前旗	察哈尔右翼后旗	察哈尔右翼中旗	锡林浩特市	扎鲁特旗	科尔沁左翼中旗	西乌珠穆沁旗
气候倾向率	−0.3400	−0.3173	−0.2984	−0.1627	0.2836	0.3624	0.4241	0.4678	0.8530**	1.1050**	1.3071**

注:*、**分别表示通过0.05和0.01显著性检验水平。下同。

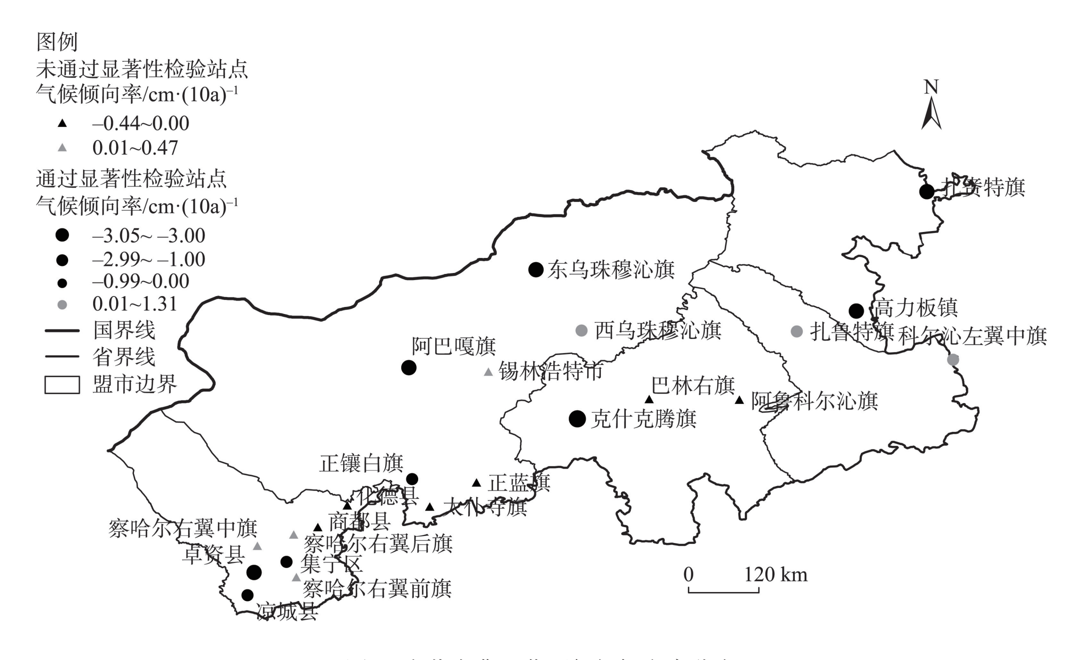


图4 内蒙古典型草原气候倾向率分布

Fig. 4 Linear trend distribution of maximum frozen soil depth changing rates in typical steppe of Inner Mongolia

表2　内蒙古典型草原最大冻土深度的年代际变化

Tab. 2　Decadal variation of the maximum frozen soil depths in typical steppe of Inner Mongolia　/cm

气象站点	1981—1990年	1991—2000年	2001—2010年	2011—2018年
高力板镇	168.9	154.5	138.6	131.9
克什克腾旗	264.1	232.0	206.1	176.9
卓资县	217.9	187.3	172.0	159.8
阿巴嘎旗	260.1	217.8	222.7	226.4
西乌珠穆沁旗	164.5	146.9	176.7	195.9
扎鲁特旗	124.4	107.8	126.3	150.1
科尔沁左翼中旗	127.1	105.3	142.9	151.8
锡林浩特市	234.3	230.9	242.1	249.0
太仆寺旗	232.3	209.9	220.1	226.0
察哈尔右翼前旗	133.3	118.0	124.1	144.0
察哈尔右翼中旗	198.1	180.6	195.8	207.4
察哈尔右翼后旗	209.9	183.9	193.7	220.9
集宁区	147.3	109.8	110.8	121.9
扎赉特旗	203.9	196.6	168.8	182.4
东乌珠穆沁旗	283.8	246.2	230.6	238.5
商都县	179.4	154.4	141.9	177.5
巴林右旗	173.2	152.8	147.2	167.6
正镶白旗	226.9	193.7	191.4	200.5
凉城县	149.9	143.8	118.1	135.9
化德县	186.5	160.0	179.5	176.6
阿鲁科尔沁旗	168.4	148.5	159.3	155.1
正蓝旗	233.7	211.5	237.4	213.8

厚，21世纪增幅为8.6~49.0 cm，其中西乌珠穆沁旗增幅最为明显；扎赉特旗、东乌珠穆沁旗、商都县、巴林右旗、正镶白旗、凉城县21世纪10年代之前逐年代变浅之后增厚，变浅时的减幅为1.9~45.3 cm，其中东乌珠穆沁旗减幅最大，21世纪10年代较00年代增幅为7.9~35.6 cm，商都县增幅最大。第3类无明显变化规律，这些站点是化德县、阿鲁科尔沁旗和正蓝旗。

根据Mann-Kendall气候突变检测发现，研究区最大冻土深度分别在1986、1988、1989、2014年和2015年发生了突变，有11个站点在1989年（包括1989年）之后最大冻土深度发生突变，从一个相对较深期跃变为一个相对偏浅期，说明内蒙古典型草原大部地区冻土存在一定的退化趋势。

2.4 最大冻土深度与气象因子的相关分析

影响冻土深度变化的成因十分复杂，气候因素、地形因素和人为活动都会对冻土深度产生影响，其中气候因素对冻土深度的影响较大[33]。为了进一步了解内蒙古典型草原季节性冻土深度对气候变化的响应过程，探讨气象因素的影响，根据斯蒂芬公式冻结指数影响冻结深度变化，将可能影响年最大冻土深度的年平均气温、气温年较差、年极端最高气温、年极端最低气温、平均相对湿度、年降水量、最大积雪深度、平均40 cm地温、平均80 cm地温、日照时数、年平均风速11个气象因子和气温冻结指数、地面冻结指数2个冻结指数，分别与最大冻土深度进行Pearson相关分析。Pearson相关分析表明（表3），年最大冻土深度与11个气象因子、2个冻结指数均通过了0.01显著性检验水平，其中相关性最大的是年平均气温，其次是40 cm地温。最大冻土深度与年极端最高气温、年降水量、最大积雪深度、日照时数呈现微弱相关；最大冻土深度与气温年较差、平均相对湿度、年平均风速呈现低度相关；最大冻土深度与年平均气温、气温冻结指数、地面冻结指数、年极端最低气温、平均40 cm地温、平均80 cm地温呈现中度相关。

排除微弱相关的自变量后，将低度相关和中度相关的自变量与最大冻土深度进行线性回归分析，

表3　内蒙古典型草原最大冻土深度与气象因子Pearson相关系数

Tab. 3　Pearson correlation coefficient between maximum frozen soil depths and meteorological factors in typical steppe of Inner Mongolia

气象因子	年平均气温	气温冻结指数	地面冻结指数	气温年较差	年极端最高气温	年极端最低气温	平均相对湿度
Pearson相关系数	-0.698**	-0.680**	0.569**	0.386**	-0.112**	-0.577**	0.371**
气象因子	年降水量	最大积雪深度	平均40 cm地温	平均80 cm地温	日照时数	年平均风速	
Pearson相关系数	-0.147**	0.167**	-0.692**	-0.656**	0.185**	0.358**	

结果发现年平均气温、气温冻结指数、平均40 cm地温、平均80 cm地温方差膨胀系数(VIF)大于5,而且4个变量之间存在着多重共线性。地面冻结指数、平均40 cm地温、平均80 cm地温的t检验对应的显著性水平大于0.05,考虑到最大冻土深度变化受负积温和人为因素的多重影响,选择气温冻结指数、气温年较差、平均相对湿度、年平均风速、年极端最低气温与最大冻土深度再次进行线性回归分析,结果显示,5个自变量的调整后R^2能够解释最大冻土深度变化的51.7%,可以接受其反应的影响,Durbin-Watson检验统计量为0.673,变量之间存在自相关。方差分析显示F统计量的观察值为172.916,概率P值为0,在显著性水平0.05的情形下,认为气温冻结指数、气温年较差、平均相对湿度、年平均风速、年极端最低气温中至少存在1个自变量与最大冻土深度之间存在线性关系。根据多元线性回归的系数列表(表4)t检验对应的显著性水平气温冻结指数、年平均风速、年极端最低气温均为0,证明与最大冻土深度有显著影响,气温年较差、平均相对湿度对最大冻土深度影响不显著。根据容差,各自变量VIF均小于10,说明这5个气象因子之间不存在共线性,所以最大冻土深度与气象因子、冻结指数的多元线性回归方程为:

$$y = -32.340 - 0.056x_1 - 0.144x_2 + 0.487x_3 + 8.445x_4 - 2.797x_5 \tag{11}$$

式中:y为最大冻土深度(cm);x_1为气温冻结指数(℃·d);x_2为气温年较差(℃);x_3为平均相对湿度(%);x_4为年平均风速(m·s^{-1});x_5为年极端最低气温(℃)。模型残差基本符合正态曲线,服从正态分布。

由此可见气温冻结指数、年平均风速、年极端最低气温会对最大冻土的深度变化产生显著影响。近年来随着全球气候变暖,人为活动的增加,产生了大量的温室气体,致使温室效应加剧,随着气温的升高,影响负积温的变化,从而影响冻土的深度变化。一些研究表明[34]在全球陆面温度普遍升高的过程中,往往最低温度升高值大于最高温度升高值,在四季中极端最低温度均显示增温[35],以冬季增温最明显,这些增温中心有新疆北部、内蒙古中部、华北、东北南部、江淮流域、华南沿海,而内蒙古中部的最大冻土深度变化恰好与上述研究区域相吻合。冻土减小反应了内蒙古典型草原冬季气候变暖的事实,尤其响应了20世纪90年代气候变暖的结论,同时也说明了冻土深度对气候变化响应较为敏感。

表4　内蒙古典型草原最大冻土深度与气象因子的线性回归模型

Tab. 4　Linear regression model between maximum frozen soil depths and meteorological factors in typical steppe of Inner Mongolia

气候因子	未标准化系数		标准化系数	t检验	显著性	共线性统计	
	回归系数	标准误差	回归系数			容差	方差膨胀系数(VIF)
常量	-32.340	17.706	-	-1.826	0.068	-	-
气温冻结指数	-0.056	0.004	-0.463	-13.303	0.000	0.494	2.023
气温年较差	-0.144	0.389	-0.012	-0.371	0.711	0.578	1.729
平均相对湿度	0.487	0.286	0.050	1.699	0.090	0.679	1.472
年平均风速	8.445	1.638	0.134	5.154	0.000	0.879	1.138
年极端最低气温	-2.797	0.449	-0.238	-6.229	0.000	0.411	2.433

注:-表示没有数值。

3 讨 论

本研究采用冻土器测量土壤冻结深度，对1981—2018年内蒙古典型草原的季节性冻土进行了时空分布、年际变化、年代际变化研究，利用Mann-Kendall法进行气候突变检测，38 a中最大冻土深度变浅薄趋势明显，11个站点在1989年之后最大冻土深度发生突变。通常最大冻土深度受多种气象因子的相互作用，本研究发现年气温冻结指数、年极端最低气温影响冻土深度的变化，值得注意的是年平均风速与最大冻土深度变化存在正相关，考虑到风速的加大会增加土壤表面水分的蒸发[36]，而蒸发消耗土壤热量，导致冻土深度加深，具体情况有待研究。

影响最大冻土深度变化的因素十分复杂，不仅在于气象因子的作用，相关研究表明海拔的升高会使最大冻土深度减幅加大[29]，不同植被类型影响最大冻土消融速率[37]，水域空间分布、土壤性质以及人为活动对最大冻土深度都有着制约作用[38]。近年来，随着社会经济的发展，人为活动对最大冻土深度影响越来越明显，金会军等[39]认为人为活动，例如在高原寒区修建道路和修建其他建筑物，会影响冻土的稳定性。高春香等[40]研究发现内蒙古东北部冻土退化明显，在脆弱的冻土区修建公路，会致使冻土退化，且影响道路建设。由此，对于内蒙古典型草原季节性冻土深度变化的研究，有助于为草原冻土变化响应生态环境效应提供参考依据，为陆地土壤和大气碳循环交换的研究给出一些提示。

内蒙古典型草原的区域分布范围较广，温度和降水因地域的不同存在一定的差异，本研究采用自动气象观测站数据，由于是站点数据，对于冻土深度的研究局限在未直观反应内蒙古典型草原覆盖的全部区域。同时，随着人为活动的日益频繁，冻土的深度观测也会受人为因素影响，比如研究区附近出现人为水浇地等现象，都会影响冻土数据的观测准确性。由于影响冻土深度变化的因素存在复杂的、动态的相互作用，所以对于冻土的监测需要不断的完善、模拟和验证。

4 结 论

本文基于1981—2018年内蒙古典型草原的冻土深度数据和气象因子数据，研究了最大冻土深度的时空分布特征、年代、年代际变化规律，再进行了最大冻土深度与气象因子的相关分析，得出以下结论：

(1) 内蒙古典型草原季节性冻土变化明显，冻土初日出现在9—11月，终日出现在4—6月，年内最大冻土深度出现在2—3月，在100~280 cm之间。冻土冻结时间北部早于南部，东部早于西部；解冻时间北部晚于南部，东部晚于西部。20世纪80年代末期是最大冻土深度显著下降的重要时间点。

(2) 内蒙古典型草原最大冻土深度年际变化主要分为下开口抛物线、上开口抛物线和正弦曲线3种类型。近38 a来最大冻土深度的气候倾向率分析发现，68%的站点最大冻土深度呈现出减小趋势，减幅最大的是克什克腾旗；其余站点深度呈略增趋势，增幅最大的是西乌珠穆沁旗。最大冻土深度减小区域主要分布在典型草原中部地区。

(3) 内蒙古典型草原各站点年最大冻土深度的年代际变化主要分为逐年代递减、减-增型和无明显变化规律3种类型，其中14%的站点至今逐年代变浅，72%的站点21世纪之前逐年代变浅后存在增厚现象，其余站点无明显变化规律。最大冻土深度突变发生在1986、1988、1989、2014年和2015年，50%的站点在1989年之后存在突变，表明内蒙古典型草原大部地区季节性冻土有较明显的退化趋势。

(4) Pearson相关分析表明最大冻土深度与气温年较差、平均相对湿度、年平均风速呈低度相关；与年平均气温、气温冻结指数、地面冻结指数、年极端最低气温、平均40 cm地温、平均80 cm地温呈中度相关。多元线性回归显示气温冻结指数、年平均风速、年极端最低气温对最大冻土深度产生显著影响。

参考文献(References)

[1] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 10-12. [Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Permafrost in China[M]. Beijing: Science Press, 2000: 10-12.]

[2] 蒋复初, 吴锡浩, 王书兵, 等. 中国大陆多年冻土线空间分布基本特征[J]. 地质力学学报, 2003, 9(4): 303-312. [Jiang Fuchu, Wu Xihao, Wang Shubing, et al. Basic features of spatial distribution of the limits of permafrost in China[J]. Journal of Geomechanics, 2003, 9(4): 303-312.]

[3] Anisimov O, Reneva S. Permafrost and changing climate: The Rus-

sian perspective[J]. Ambio, 2006, 35(4): 169–175.

[4] 张中琼, 吴青柏. 气候变化情景下青藏高原多年冻土活动层深度变化预测[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 505–511. [Zhang Zhongqiong, Wu Qingbai. Predicting changes of active layer thickness on the Qinghai-Tibet Plateau as climate warming[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 505–511.]

[5] 高思如, 曾文钊, 吴青柏, 等. 1990—2014年西藏季节冻土最大冻结深度的时空变化[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 223–230. [Gao Siru, Zeng Wenzhao, Wu Qingbai, et al. Temporal and spatial variations of the maximum frozen depth of seasonally frozen soil in Tibet from 1990 to 2014[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(2): 223–230.]

[6] 张明礼, 温智, 薛珂, 等. 北麓河地区多年冻土地表能量收支分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(9): 134–138. [Zhang Mingli, Wen Zhi, Xue Ke, et al. Surface energy budget analysis in permafrost region of Beiluhe area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(9): 134–138.]

[7] 李元华, 安月改. 河北省冻土气候变化初探[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 36(6): 445–449. [Li Yuanhua, An Yuegai. Primary study on the change of frozen soil in the Hebei region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 36(6): 445–449.]

[8] Camill P. Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late-20th century climate warming[J]. Climatic Change, 2005, 68: 135–152.

[9] Anisimov O A, Nelson F E. Permafrost zonation and climate change in the northern Hemisphere: Results from transient general circulation models[J]. Climatic Change, 1997, 35(2): 241–258.

[10] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 513–527. [Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): Hydrological effect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 513–527.]

[11] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部环境演变及其影响研究[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 321–328. [Qin Dahe, Ding Yihui, Wang Shaowu, et al. A study of environment change and its impacts in western China[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 321–328.]

[12] 刘小宁, 李庆祥. 我国最大冻土深度变化及初步解释[J]. 应用气象学报, 2003, 14(3): 299–308. [Liu Xiaoning, Li Qingxiang. Change of maximum frozen soil depth in China and its primary explanation [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(3): 299–308.]

[13] 徐敩祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 102–103. [Xu Xuezu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Frozen soil physics[M]. Beijing: Science Press, 2010: 102–103.]

[14] Tokumoto I, Noborio K, Koga K. Coupled water and heat flow in a grass field with aggregated Andisol during soil-freezing periods[J]. Cold Regions Science & Technology, 2010, 62(2): 98–106.

[15] Sinha T, Cherkauer K A. Time series analysis of soil freeze and thaw processes in Indiana[J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9 (5): 936–950.

[16] Fu Q, Hou R, Li T, et al. The functions of soil water and heat transfer to the environment and associated response mechanisms under different snow cover conditions[J]. Geoderma, 2018, 325: 9–17.

[17] Wlostowski A N, Gooseff M N, Adams B J. Soil moisture controls the thermal habitat of active layer soils in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2018, 123(1): G004018, doi: 10.1002/2017JG004018.

[18] 高荣, 韦志刚, 董文杰, 等. 20世纪后期青藏高原积雪和冻土变化及其与气候变化的关系[J]. 高原气象, 2003, 22(2): 191–196. [Gao Rong, Wei Zhigang, Dong Wenjie, et al. Variation of the snow and frozen soil over Qinghai-Xizang Plateau in the late twentieth century and their relations to climate change[J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(2): 191–196.]

[19] 姚作新, 李秦, 刘卫平, 等. 1960—2015年新疆塔什库尔干河谷季节性冻土对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 257–265. [Yao Zuoxin, Li Qin, Liu Weiping, et al. Response of seasonal frozen soil to climate change in Taxkorgan River Valley of Xinjiang during 1960—2015[J]. Arid Land Geography, 2017, 40 (2): 257–265.]

[20] 王艳丽, 息涛, 张鹏, 等. 1961—2010年辽宁省季节性冻土变化特征分析[J]. 现代农业科技, 2013(21): 241–242. [Wang Yanli, Xi Tao, Zhang Peng, et al. Analysis on the characteristics of seasonal frozen soil changes in Liaoning Province from 1961 to 2010[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013(21): 241–242.]

[21] 杨晓玲, 汪宗成, 周华, 等. 河西走廊东部冻土初、终日的变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 117–122. [Yang Xiaoling, Wang Zongcheng, Zhou Hua, et al. Variation characteristics of frozen soil first and last dates in Hexi Corridor eastern[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(6): 117–122.]

[22] 杜军, 建军, 洪健昌, 等. 1961—2010年西藏季节性冻土对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 513–521. [Du Jun, Jian Jun, Hong Jianchang, et al. Response of seasonal frozen soil to climate change on Tibet region from 1961 to 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 513–521.]

[23] 张存厚. 内蒙古草原地上净初级生产力对气候变化响应的模拟[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013. [Zhang Cunhou. Responses of ANPP to climate change in Inner Mongolia grassland a simulation based on century model[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.]

[24] 许坤鹏, 武世亮, 马孝义, 等. 基于主成分分析土壤水分扩散率单一参数模型的BP神经网络模型[J]. 干旱区地理, 2015, 38 (1): 76–82. [Xu Kunpeng, Wu Shiliang, Ma Xiaoyi, et al. BP artificial neural network model of one-parameter soil moisture diffusivity model based on principal components analysis[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(1): 76–82.]

[25] 朱成刚, 艾克热木·阿布拉, 李卫红, 等. 塔里木河下游生态输水条件下胡杨林生态系统恢复研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 629-636. [Zhu Chenggang, Abula Aikeremu, Li Weihong, et al. Ecosystem restoration of *Populus euphratica* forest under the ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 629-636.]

[26] 蔡迪文, 张克存, 安志山, 等. 积沙影响下伏冻土的水热耦合模型研究[J]. 干旱区地理, 2017, 40(3): 523-532. [Cai Diwen, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. Coupled hydrothermal model of underlying permafrost influenced by sand accumulation[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(3): 523-532.]

[27] Zimov S A, Schuur E A G, Chapin F S. Permafrost and the Global Carbon Budget[J]. Science, 2006, 312: 1612-1613.

[28] 彭小清. 北半球季节冻土时空变化特征及其对气候变化的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [Peng Xiaoqing. Spatial-temporal variations of seasonally frozen ground and its response to climate change in the northern Hemisphere[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.]

[29] 毛德华, 王宗明, 宋开山, 等. 东北多年冻土区植被NDVI变化及其对气候变化和土地覆被变化的响应[J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 283-292. [Mao Dehua, Wang Zongming, Song Kaishan, et al. The vegetation NDVI variation and its responses to climate change and LUCC from 1982 to 2006 year in northeast permafrost region[J]. China Environmental Science, 2011, 31(2): 283-292.]

[30] 胡洁, 张桐瑞, 孟德惠, 等. 内蒙古典型草原8种优势植物养分回收特征[J]. 中国草地学报, 2021, 43(3): 37-43. [Hu Jie, Zhang Tongrui, Meng Dehui, et al. Plant nutrients resorption characteristics of eight dominant species in typical steppe of Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(3): 37-43.]

[31] 廖莹, 范继辉, 李怡颖, 等. 1978—2017年西藏高原冻融指数时空变化特征[J]. 草业科学, 2021, 38(6): 1035-1046. [Liao Ying, Fan Jihui, Li Yiying, et al. Spatiotemporal variations in freezing and thawing indices on the Tibetan Plateau during 1978—2017 [J]. Pratacultural Science, 2021, 38(6): 1035-1046.]

[32] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 37-63. [Wei Fengying. Modern climate statistics diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 37-63.]

[33] 常晓丽, 兰爱玉, 帖利民, 等. 大兴安岭西坡多年冻土地温变化模拟[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(2): 21-27. [Chang Xiaoli, Lan Aiyu, Tie Limin, et al. Modelled thermal of permafrost on the western slope of the Da Xing'anling Mountains[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(2): 21-27.]

[34] 刘小宁, 李庆祥. 我国最大冻土深度变化及初步解释[J]. 应用气象学报, 2003, 14(3): 299-308. [Liu Xiaoning, Li Qingxiang. Change of maximum frozen soil depth in China and its primary explanation [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(3): 299-308.]

[35] 任福民, 翟盘茂. 1951—1990年中国极端气温变化分析[J]. 大气科学, 1998, 22(2): 217-227. [Ren Fumin, Zhai Panmao. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951—1990 [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1998, 22(2): 217-227.]

[36] 金东艳, 高琼. 风速及刈割对草原土壤水分与生产力的影响[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 48-53. [Jin Dongyan, Gao Qiong. Impacts of wind and mowing on soil moisture and productivity in steppe[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 48-53.]

[37] 白云. 祁连山不同植被类型覆盖下冻土水热特征变化研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020. [Bai Yun. Study on variations of the hydro-thermal characteristics of frozen under different vegetation types in Qilian Mountain[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020.]

[38] 李林, 朱西德, 汪青春, 等. 青海高原冻土退化的若干事实揭示[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 320-328. [Li Lin, Zhu Xide, Wang Qingchun, et al. Mapping and analyses of permafrost change in the Qinghai Plateau using GIS[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 320-328.]

[39] 金会军, 王绍令, 吕兰芝, 等. 黄河源区冻土特征及退化趋势[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 10-17. [Jin Huijun, Wang Shaoling, Lü Lanzhi, et al. Features and degradation of frozen ground in the sources area of the Yellow River, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(1): 10-17.]

[40] 高春香, 苏立娟, 宋进华, 等. 内蒙古东北部冻土分布与地温关系[J]. 内蒙古气象, 2004(1): 19-22. [Gao Chunxiang, Su Lijuan, Song Jinhua, et al. The relationship between the distribution of frozen soil and ground temperature in northeastern Inner Mongolia [J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2004(1): 19-22.]

Response of seasonal frozen soil to climate change on a typical steppe of Inner Mongolia during 1981—2018

SU Yue[1], ZHANG Cunhou[1,2], Amuersana[3], LI Ke[4]

(1. Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Disaster Monitoring and Warning Center, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Ecological and Agricultural Meteorology Center, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 3. Hohhot Bureau of Meteorology, Hohhot 010000, Inner Mongolia, China; 4. Xuzhou Bureau of Meteorology, Xuzhou 221000, Jiangsu, China)

Abstract: This study investigates patterns of seasonally frozen soil in the context of climate change and assesses meteorological factors affecting variations in maximum frozen soil depth. Spatial and temporal characteristics of maximum frozen soil depth were evaluated for an area of typical steppe in Inner Mongolia, northern China over the most recent 38 years (1981—2018). Interannual and interdecadal variations were analyzed statistically using climate tendency rate, cumulative distance level, Mann-Kendall methods, and multiple linear regression. Meteorological data such as temperature, wind speed and relative humidity were used to analyze potential controls on maximum frozen soil depth. The study found that, for seasonally frozen soil of the Inner Mongolian steppe: (1) Soil typically freezes from September-November and thaws from April-June, with a maximum frozen soil depth of 100−280 cm attained in February-March. (2) Interannual variations in maximum frost depth can be classified into three patterns (lower open parabolic, upper open parabolic, and sinusoidal), with 68% of stations showing a trend of decreasing depth over time. (3) Interdecadal variations can also be divided into three types (decreasing chronologically, decreasing then increasing, and no clear pattern), with 50% of stations recording progressively shallower depths before 1989 followed by a change to a trend of thickening with time. (4) Multiple linear regression suggests that temperature freezing index, annual mean wind speed, and annual extreme minimum temperature had significant effects on maximum frozen soil depth.

Key words: seasonal frozen soil; climate change; typical steppe; multi-variate linear regression